

10/561287

WO 2005/001512

PCT/EP2004/005845

IAP20 Rec'd PCT/PTO 20 DEC 2005**Dosimeter zur Erfassung hochenergetischer Neutronenstrahlung****Beschreibung**

Die Erfindungsmeldung betrifft ein Dosimeter zur Erfassung hochenergetischer Neutronenstrahlung gemäß Anspruch 1.

Weltweit werden Beschleunigeranlagen für Forschungszwecke und zur Nutzung im industriellen und medizinischen Umfeld betrieben. In diesen Beschleunigeranlagen werden Teilchen auf sehr hohe Energien beschleunigt. Beispielsweise werden in modernen Schwerionenbeschleunigern Ionen bis auf Energien von ca. 1 GeV pro Nukleon beschleunigt. In anderen Anlagen werden Teilchen auf noch höhere Energien bis in den Bereich Tera-Elektronenvolt (TeV) beschleunigt. Diese hochenergetischen Teilchen produzieren Sekundärstrahlung, geladene Teilchen und Neutronen, wenn sie mit Materie in Wechselwirkung treten. Das Energiespektrum der erzeugten Neutronen reicht von 0,025 eV bis einige hundert Giga-Elektronenvolt (GeV), da die maximale Energie der erzeugten Neutronen denselben Energiebereich wie die der primären Teilchenstrahlen aufweist. Für den Strahlenschutz ist es notwendig, die erzeugten Neutronen zu messen, um Strahlenschutzmaßnahmen, insbesondere Abschirmungen, zu dimensionieren. Da hochenergetische Neutronen eine große mittlere Weglänge in Materie haben, können sie auch sehr starke Abschirmungen durchdringen. Deshalb ist es notwendig und von großer Bedeutung, ständig die Neutronenintensitäten, sowie Energie- und Winkelverteilung der Neutronen zu messen und zu überwachen, auch außerhalb der Abschirmungen. Personen, die sich im Bereich der Beschleunigeranlagen (innerhalb oder außerhalb der Abschirmungen) bewegen, müssen ständig Personendosimeter tragen, die die aktuelle Neutronendosis der diese Perso-

WO 2005/001512

PCT/EP2004/005845

2

nen ausgesetzt sind messen und speichern. Insbesondere für die Strahlenschutzüberwachung ist es wichtig, Dosimeter zum Nachweis von Neutronenstrahlung zu entwickeln, die im gesamten Energiebereich der Neutronenstrahlung vom Bereich thermischer Neutronen
5 (0,025 eV) bis zu den höchsten Energien im Bereich von GeV oder höher (bis zu 1 TeV) verwendet werden können.

Dosimeter für Neutronenstrahlung wurden bisher für Bereiche der Kerntechnik (Kernreaktoren, Radio-Nuklidquellen, Brennelementeindustrie, Transport von abgebrannten Brennelementen) entwickelt,
10 die Dosismessungen für Energien bis maximal ca. 10 bis 20 MeV ermöglichen.

Das Ansprechvermögen der meisten Dosimetertypen ist für Neutronen höherer Energie als 20 MeV sehr gering, wobei mit steigender Neutronenenergie das Ansprechvermögen abnimmt. Einer der
15 Gründe für diesen Effekt ist die Abnahme des Wirkungsquerschnittes, der für den Nachweis genutzten Reaktionen mit zunehmender Neutronenenergie. Im Allgemeinen gilt, dass mit zunehmender Neutronenenergie die in elastischer und inelastischer Streuung erzeugten Teilchen auch energiereicher werden. Es gilt für das Abbremsungs-
20 vermögen von geladenen energiereichen Teilchen, dass mit zunehmender Energie das Abbremsvermögen und damit auch die Energiedeposition in der Dosimeterschicht abnimmt. Dies führt ab einer bestimmten Energie der geladenen Teilchen dazu, dass diese nicht mehr nachgewiesen werden können. Neutronenfelder mit Anteilen
25 an Neutronen höherer Energien im Energiespektrum können dann nur über spezielle Kalibrierfaktoren in der Dosisabschätzung gemessen werden. In Beschleunigern sind jedoch die Neutronenfelder in ihrer Energieverteilung sehr unterschiedlich, so dass einheitliche Ka-

WO 2005/001512

3

PCT/EP2004/005845

librierfaktoren nicht immer angegeben werden können. Dosimetrische Systeme, die den gesamten Energiebereich messen, existieren bisher nicht.

5 Es gibt in der Literatur Ansätze, das Ansprechvermögen der Neutronendosimeter für hohe Neutronenenergien zu verbessern, indem die Neutronenenergie mittels Vorschaltung eines Moderators vor das eigentliche Dosimeter erniedrigt wird. Dieser Ansatz kann für die extrem hohen Neutronenenergien nicht verwendet werden, da die Moderationskörper zu großvolumig im Einsatz in einem Personendosimeter wären.

10 Des weiteren wird die Verwendung von radioaktiven Folien aus spaltbarem Material zusammen mit Kernspurdetektoren beschrieben. Auch diese sind als Personendosimeter nicht sinnvoll einsetzbar, da Dosimeter mit radioaktiven Bestandteilen in der Personendosimetrie nicht verwendbar sind.

Aufgabe der Erfindung ist es, Dosimeter zur Erfassung hochenergetischer Neutronenstrahlung zu entwickeln, die es gestatten hohe Neutronenenergien bis zu sehr hohen Energien von beispielsweise 1 TeV zu messen.

20 Zur Lösung dieser Aufgabe wird ein Dosimeter mit den in Anspruch 1 genannten Merkmalen vorgeschlagen. Da es sich bei Neutronen um elektrisch neutrale Teilchen handelt, können diese nicht direkt mittels eines Ionisationsprozesses nachgewiesen werden, es erfolgt daher eine Umwandlung in ionisierende Strahlung. Die hochenergetischen Neutronen werden mit Hilfe von Metallatomen in geladene Teilchen
25 wie Protonen, Alphateilchen und andere geladene Kerne umgewan-

WO 2005/001512

4

PCT/EP2004/005845

delt, die direkt in einem Detektionselement des Dosimeters nachgewiesen werden können.

Das Dosimeter mit den in Anspruch 1 genannten Merkmalen erfüllt die folgenden Anforderungen:

- 5 1. Es wird ein ausreichend großer Wirkungsquerschnitt für Reaktionen der einfallenden Neutronen mit den Metallatomen des Neutronenkonverters realisiert, so dass die Energie der Neutronen umgesetzt wird in Protonen, Alpha-Teilchen und andere geladene Kerne.
- 10 2. Der Wirkungsquerschnitt des Dosimeters ist energieabhängig. Durch geeignete Wahl der Metallatome wird sichergestellt, dass dieser auch bei sehr hohen Neutronenenergien noch ausreichend groß ist.
- 15 3. Bei der Umsetzung der Energie von Neutronen in die oben genannten Teilchen wird sichergestellt, dass diese eine ausreichend hohe Energie haben, um von dem Detektionselement erfasst zu werden. Gleichzeitig ist ihre Energie nicht so groß, so dass eine genügend hohe Energiedeposition im Detektionselement erfolgen kann.
- 20 4. Bei der Umsetzung der Energie der Neutronenstrahlung treten folgende physikalische Effekte auf: Spallation, Fragmentation und Spaltung. Zur Detektion der hochenergetischen Neutronenstrahlung werden hier die bei der Spallation und bei der Fragmentation entstehenden Teilchen ausgenutzt.

25

WO 2005/001512

5

PCT/EP2004/005845

Bevorzugt wird ein Ausführungsbeispiel eines Dosimeters, das sich dadurch auszeichnet, dass der Neutronenkonverter mehrere Schichten umfasst, die jeweils Metallatome einer bestimmten Kernladungszahl aufweisen. Dadurch können Neutronenstrahlungen unterschiedlicher Energie optimal ausgewertet werden.

Ein weiteres bevorzugtes Ausführungsbeispiel zeichnet sich dadurch aus, dass der Neutronenkonverter eine dünne Schicht mit ^6Li - und/oder ^{10}B -Atomen und/oder ^{14}N -Atomen aufweist. Vorzugsweise wird für die ^{14}N -Atome umfassende Schicht ein Polyamid wie beispielsweise Nylon verwendet. Die Atome sind vorzugsweise in einer dünnen Schicht angeordnet, die von der der Neutronenstrahlung zugewandten Seite des Dosimeters aus gesehen, vor dem Detektionselement liegt. Das so aufgebaute Dosimeter ist dazu geeignet, zusätzlich Neutronenstrahlung mit einer geringeren Energie, beispielsweise thermische Neutronen zu erfassen.

Ein weiteres Ausführungsbeispiel zeichnet sich dadurch aus, dass ein wasserstoffhaltiges Polymer vorgesehen ist. Dabei ist der Neutronenkonverter mit unterschiedlichen Schichten versehen, von denen die der Neutronenstrahlung zugewandte erste Schicht Metallatome, die darunter liegende zweite Schicht das wasserstoffhaltige Polymer und die dritte Schicht ^6Li - und/oder ^{10}B -Atome und/oder ^{14}N -Atome enthält. Die dritte Schicht ist unmittelbar in der Nähe des Detektorelements angeordnet oder auf diesem vorgesehen.

Weitere Ausgestaltungen ergeben sich aus den übrigen Unteransprüchen.

Die Erfindung wird im Folgenden anhand der Zeichnungen näher erläutert. Es zeigen:

WO 2005/001512

6

PCT/EP2004/005845

- Figur 1 ein Dosimeter mit einem Neutronenkonverter der Metallatome aufweist und einem Detektionselement;
- Figur 2 ein Dosimeter mit einem eine Anzahl von Schichten mit Metallatomen unterschiedlicher Kernladungszahl Z aufweisenden Neutronenkonverter und einem Detektionselement;
- Figur 3 ein Dosimeter mit einem Neutronenkonverter, der unterschiedliche Schichten aufweist, die der Erfassung von Neutronenstrahlung unterschiedlicher Energie dienen, außerdem ein Detektionselement;
- Figur 4 ein Dosimeter mit einem Neutronenkonverter, der unterschiedliche Schichten aufweist zur Erfassung von Neutronenstrahlung unterschiedlicher Energie dienen, außerdem ein Detektionselement;
- Figur 5 ein Dosimeter mit Bereichen unterschiedlicher Dicke sowie einem Detektionselement;
- Figur 6 eine Draufsicht auf ein Dosimeter mit einem Neutronenkonverter, der unterschiedliche Felder aufweist und
- Figur 7 ein Dosimeter mit einer Anzahl von Detektionselementen zur Ortsdosimessung.

Das in Figur 1 dargestellte Dosimeter 1 ist im Querschnitt dargestellt. Dadurch wird erkennbar, dass das Dosimeter einen Neutronenkonverter 3 und ein Detektionselement 5 aufweist. Bei der Erfassung hochenergetischer Neutronenstrahlung treffen die Neutronen bei der

WO 2005/001512

PCT/EP2004/005845

7

Darstellung gemäß Figur 1 von oben auf den Neutronenkonverter 3 auf. Der Neutronenkonverter 3 umfasst Metallatome 7, auf die die hochenergetischen Neutronen auftreffen. Falls die einfallenden Neutronen auf ein Metallatom mit vielen Nukleonen treffen, kommt es zur Spallation, also zur Abdampfung von Protonen und Neutronen. Es bildet sich eine intranukleare Kaskade im Kern des Metallatoms, bei der außer Protonen Neutronen emittiert werden, deren Energie geringer ist als die der auf das Dosimeter 1 auftreffenden Neutronen.

10 Die auf die Metallatome 7 auftreffenden Neutronen lassen die Kerne der Metallatome zerbrechen, es kommt also zu einer Fragmentation des auch als Targetkern bezeichneten Metallatoms in mehrere Kerne und anschließend zu einem Verdampfungsprozess von geladenen Teilchen. Dabei werden, außer Protonen und Alpha-Teilchen
15 sowie weiteren Fragmenten, Neutronen erzeugt. Die Energie der entstehenden geladenen Teilchen ist geringer als die der auf das Dosimeter 1 auftreffenden Neutronen.

Beim Auftreffen der hochenergetischen Neutronenstrahlung auf den Neutronenkonverter 3 des Dosimeters 1 finden die Spallation oder
20 die Fragmentation statt. Im Übrigen findet auch noch eine Spaltung schwerer Kerne in zwei Kerne unter Freisetzung von zwei bis drei Neutronen statt. Dies allerdings vorwiegend bei der Verwendung von Metallatomen radioaktiver Substanzen. Bei der Verwendung des Dosimeters 1 als Personendosimeter wird naturgemäß darauf geachtet,
25 dass keine radioaktiven Metallatome eingesetzt werden.

Sie haben aber je nach Energie der einfallenden Neutronen einen unterschiedlichen Wirkungsquerschnitt. Dadurch weist das Dosime-

WO 2005/001512

8

PCT/EP2004/005845

ter eine unterschiedliche Ansprechfunktion oder ein unterschiedliches Ansprechvermögen auf. Fallen Neutronen mit einer Energie von ca. 30 MeV auf das Dosimeter, so werden durch die bei der Spallation auftretende intranukleare Kaskade Protonen erzeugt, deren Energie von dem Detektionselement 5 erfassbar ist. Die Energie ist allerdings so gering, dass das Detektionselement 5 nicht anspricht.

Bei einer höheren Energie der auf das Dosimeter 1 auftreffenden Neutronenstrahlung ergibt sich Folgendes:

- 10 Die durch Kaskadenprozesse erzeugten Protonen haben entsprechend der höheren Energie der einfallenden Neutronen ihrerseits eine höhere Energie, die schließlich bei steigender Energie der Neutronen so groß ist, dass diese Protonen von dem Detektionselement 5 nicht mehr registrierbar sind. Bei der gleichzeitig gegebenen Fragmentation werden in diesem Fall Protonen erzeugt, deren Energie so
- 15 groß ist, dass sie von dem Detektionselement 5 erfassbar werden.

Es zeigt sich also, dass bei der Erfassung der Neutronenstrahlung bei einer niedrigeren Energie aufgrund der Abdampfung von Protonen eine Detektion mittels des Detektionselements 5 möglich ist. Bei

20 einer höheren Energie der zu erfassenden Neutronenstrahlung kann eine Detektion im Detektionselement 5 nicht bezüglich der durch die intranukleare Kaskade erzeugten Protonen erfolgen. Hier sind es die im Fragmentationsprozess durch Abdampfung entstehenden Protonen, die von dem Detektionselement 5 des Dosimeters 1 erfasst

25 werden können. Dadurch ergänzen sich also diese beiden physikalischen Effekte bei der Erfassung hochenergetischer Neutronenstrahlung, wobei bis zu Energien von 30 MeV die intranukleare Kaskade

WO 2005/001512

9

PCT/EP2004/005845

der zur Detektion beitragende Prozess ist und für Energien ab einigen 100 MeV die Verdampfungsprozesse bei der Fragmentation dominierend sind.

Um Neutronenstrahlung unterschiedlicher Energie erfassen zu können, werden die Kernladungszahlen der Metallatome so gewählt, dass im Rahmen der Spallation und der Fragmentation erzeugte Protonen sicher im Detektionselement 5 erfasst werden können. Die Spallation und Fragmentation findet nur bei Vorhandensein von Metallatomen mit genügend hoher Kernladungszahl statt, dadurch dass auf das Dosimeter 1 auftreffende Neutronen die Kerne der Metallatome aufheizen und die kinetische Energie des eintreffenden Neutrons auf viele Nukleonen verteilt wird. Erst wenn die Energie des eintreffenden Neutrons auf ausreichend viele Nukleonen verteilt ist, findet eine Abdampfung von Neutronen, Protonen und Alpha-Teilchen statt, deren Energie so ist, dass sie im Detektionselement 5 des Dosimeters 1 registriert werden können.

Insgesamt wird also durch die auf die Metallatome 7 auftreffenden Neutronen ein Teilchenspektrum erzeugt, dessen Energie geringer ist als die Energie der auftreffenden Neutronen. Da die Kernladungszahl Z der Metallatome die Energieverteilung der emittierten Teilchen bestimmt, kann sie so gewählt werden, dass die Teilchen von dem Detektionselement 5 erfasst werden können.

Durch die Wahl der Kernladungszahl Z der Metallatome kann auch bei unterschiedlicher Energie der zu erfassenden Neutronenstrahlung sichergestellt werden, dass jeweils Teilchen mit einem Energiespektrum erzeugt werden, die von dem Detektionselement 5 erfassbar sind. Beispielsweise kann für die im Neutronenkonverter 3 vor-

WO 2005/001512

10

PCT/EP2004/005845

handenen Metallatome 7 eine Kernladungszahl $Z > 15$ gewählt werden. Vorzugsweise werden Metallatome mit einer Kernladungszahl $Z > 20$ gewählt, um auch bei sehr hochenergetischer Neutronenstrahlung Teilchen entstehen zu lassen, die von dem Detektionselement 5 erfassbar sind.

Beispielsweise können in dem Neutronenkonverter 3 Metallatome der Eisengruppe (Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Mn, Co, Cu) mit einer Kernladungszahl $Z \geq 20$ und/oder der Gruppe beginnend mit der Kernladungszahl $Z = 39$ (Y, Zr, Nb, Mo, Rh, Pd und Ag, In) und/oder der Gruppe beginnend mit der Kernladungszahl $Z \geq 55$ (Sb, Cs, Ce, Ba, La) und/oder der Gruppe beginnend mit der Kernladungszahl $Z \geq 63$ (Eu, Wd, Sm, Ga, Er) und/oder der Gruppe beginnend mit der Kernladungszahl $Z > 74$ (Ta, W, Re, Au, Pt) und/oder mit der Kernladungszahl $Z = 80$ (Hg) und $Z = 82$ (Pb) und $Z = 83$ (Bi) gewählt werden.

Für die Erfassung hochenergetischer Neutronenstrahlung werden besonders bevorzugt Metallatome von Titan, Kupfer, Eisen, Wolfram oder Blei. Aus diesen Metallen lassen sich nämlich leicht Metallplättchen herstellen, die ausgewalzt werden können.

Um das Dosimeter 1 auf die Erfassung von Neutronenstrahlung bestimmter Energie abstimmen zu können, werden auch Metallatome von Legierungen verwendet. Bevorzugt wird Elconite eingesetzt, das im Wesentlichen aus 35% Cu und 65% W besteht. Darüber hinaus können auch Atome von Metall enthaltenden Keramiken (Yttriumoxid, Cer-Oxid) eingesetzt werden. Insgesamt ist festzuhalten, dass die in dem Neutronenkonverter 3 vorgesehenen Metallatome 7 danach ausgewählt werden, welche Energie der Neutronenstrahlung

WO 2005/001512

11

PCT/EP2004/005845

erwartet wird. Die Kernladungszahl der Metallatome wird entsprechend auf das zu erfassende Energiespektrum der Neutronenstrahlung abgestimmt.

Die Dicke des Neutronenkonverters 3 und die Anzahl der im Neutronenkonverter 3 vorhandenen Metallatome 7 muss so gewählt werden, dass einerseits eine ausreichend hohe Anzahl von Protonen erzeugt wird, und dass andererseits diese trotz ihrer begrenzten Reichweite das Detektionselement 5 erreichen und dort eine nachweisbare Spur hinterlassen. Vorzugsweise wird eine Bleischicht von cirka 2 mm Dicke als Neutronenkonverter 5 gewählt.

In Figur 1 ist schematisch dargestellt, dass der Neutronenkonverter 3 einzelne Metallatome 7 umfasst. Bevorzugt wird der Neutronenkonverter 3 durch eine auf das Detektionselement 5 aufgebrachte metallische Schicht realisiert, beispielsweise durch eine Metallfolie, die vorzugsweise in einem Walzprozess hergestellt wird, oder durch eine auf das Detektionselement 5 aufgedampfte Metallschicht.

Dabei können Metallatome von Metallen in Reinstform verwendet werden oder von Legierungen. Es ist also möglich, Metallfolien oder eine aufgedampfte Schicht aus Metallatomen in Reinstform oder aus einer Legierung zu realisieren.

Figur 2 zeigt ein abgewandeltes Ausführungsbeispiel eines Dosimeters 1 im Querschnitt. Gleiche Teile sind mit gleichen Bezugsziffern versehen, so dass auf die Beschreibung zu Figur 1 verwiesen wird, um Wiederholungen zu vermeiden.

Das Dosimeter 1 weist einen Neutronenkonverter 3 auf, der mehr als eine Schicht, hier beispielsweise fünf Schichten 3a bis 3e aufweist.

WO 2005/001512

PCT/EP2004/005845

12

Der Neutronenkonverter 3 umfasst, wie bei dem Ausführungsbeispiel nach Figur 1, Metallatome 7, die an die Energie der zu erfassenden Neutronenstrahlung angepasst sind.

Bei dem hier dargestellten Ausführungsbeispiel sind in der obersten, der Neutronenstrahlung ausgesetzten Schicht 3a, Metallatome 7a vorgesehen. In der darunter liegenden Schicht 3b sind Metallatome 7b vorhanden. Entsprechend sind in den Schichten 3c, 3d und 3e, Metallatome 7c, 7d und 7e vorhanden.

Auch hier können die Metallatome in den einzelnen Schichten von Metallen in Reinstform vorliegen oder in Form von Legierungen.

Besonders wird bevorzugt ein Ausführungsbeispiel des Dosimeters 1, bei dem in den unterschiedlichen Schichten 3a bis 3e jeweils Metallatome unterschiedlicher Kernladungszahl Z vorhanden sind.

Bevorzugt ist ein Ausführungsbeispiel des Dosimeters 1, bei dem von oben nach unten in den einzelnen Schichten 3a bis 3e Metallatome 7a bis 7e vorhanden sind, deren Kernladungszahl Z pro Schicht unterschiedlich ist. Dabei werden in der obersten Schicht 3a Metallatome mit der größten Kernladungszahl und abgestuft in Richtung zum Detektionselement 5 in der untersten Schicht 3e Metallatome 7e mit der kleinsten Kernladungszahl vorgesehen.

Die Kernladungszahl der Metallatome 7a bis 7e und der Abstand der jeweiligen Metallatome 7a bis 7e beziehungsweise der zugehörigen Schichten 3a bis 3e werden gewählt in Abhängigkeit von dem Energiespektrum der zu detektierenden Neutronenstrahlung.

WO 2005/001512

13

PCT/EP2004/005845

Bei dem in Figur 2 dargestellten Ausführungsbeispiel des Dosimeters 1 ist es möglich, die Kernladungszahl der Metallatome 7a bis 7e pro Schicht von oben nach unten in Richtung zum Detektionselement 5 kontinuierlich abnehmen zu lassen oder aber auch innerhalb
5 der Schichten eine freie Wahl der Kernladungszahl zuzulassen. Es kann also auch eine tiefer liegende Schicht Metallatome mit einer größeren Kernladungszahl aufweisen, als dies in den benachbarten Schichten der Fall ist.

Die Wahl der Folge der Schichten mit Metallatomen unterschiedlicher Kernladungszahl ist somit dem Energiespektrum der einfallenden zu messenden Neutronenstrahlung anpassbar, um ein optimiertes Ansprechvermögen des Dosimeters zu erreichen.
10

Die einzelnen Schichten des Dosimeters 3a bis 3e des Dosimeters nach Figur 2 können durch Metallfolien und/oder durch Metallbedampfung erzeugt werden. Es ist also möglich, Dosimeter 1 mit verschiedenen Schichten herzustellen, die nur aus Folien bestehen oder die nur durch Metallbedampfung erzeugt wurden. Denkbar ist es aber auch, Metallfolien und Metallbedampfung zu kombinieren und in beliebiger Reihenfolge abzuwechseln.
15

Im Übrigen kann noch vorgesehen werden, dass die einzelnen Schichten 3a bis 3e unterschiedlich dick ausgelegt sind, um das Ansprechverhalten des Dosimeters 1 auf Neutronenstrahlungen unterschiedlicher Energien abzustimmen.
20

Figur 3 zeigt ein weiteres Ausführungsbeispiel eines Dosimeters 1 im Querschnitt. Gleiche Teile sind mit gleichen Bezugsziffern versehen, so dass auf die Beschreibung zu den vorangegangenen Figuren verwiesen wird.
25

WO 2005/001512

PCT/EP2004/005845

14

Das Dosimeter 1 weist einen Neutronenkonverter 3 auf, der hier zwei Schichten 3a und 3b umfasst, außerdem ein Detektionselement 5.

5 In der der einfallenden Neutronenstrahlung zugewandten Schicht 3a sind wiederum Metallatome 7 vorgesehen, die, wie bei dem Ausführungsbeispiel gemäß Figur 2, von Metallen in Reinstform oder von Legierungen stammen können. Im Übrigen ist es möglich, die Schicht 3a durch eine Metallfolie oder durch Metallbedampfung zu realisieren.

10 In der Schicht 3b sind ^6Li - und/oder ^{10}B -Atome und/oder ^{14}N -Atome 9 vorhanden.

Zur Funktion des Dosimeters 1 ist Folgendes festzuhalten:

15 Treffen auf die der Neutronenstrahlung zugewandte Schicht 3a mit den Metallatomen 7 Neutronenstrahlen, so werden aufgrund von Spallation und Fragmentation, wie anhand der Ausführungsbeispiele gemäß Figuren 1 und 2 erläutert, Protonen, Alpha-Teilchen und andere Kerne erzeugt, die in dem Detektionselement 5, das lediglich geladene Teilchen erfassen kann, detektierbar sind. Insofern wird auf das in den Figuren 1 und 2 Erläuterte verwiesen.

20 Beim Auftreffen der hochenergetischen Neutronen auf die Metallatome 7 in der Schicht 3a werden aber auch Neutronen freigesetzt, deren Energie geringer ist als die der auftreffenden Neutronen. Die Neutronen an sich sind für das Detektionselement 5 nicht wahrnehmbar. Sie treffen bei dem in Figur 3 dargestellten Ausführungsbeispiel auf die ^6Li - und/oder ^{10}B -Atome 9, wodurch eine (n, α)-
25 Reaktion auftritt und/oder auf die ^{14}N -Atome, wodurch eine (n, p)-Reaktion auftritt, durch die die hier auftreffenden Neutronen der Me-

WO 2005/001512

15

PCT/EP2004/005845

tallatome 7 in geladene Alpha-Teilchen beziehungsweise in Protonen konvertiert werden. Diese können von dem Detektionselement 5 registriert werden.

5 Mittels der ^6Li - und/oder ^{10}B - und/oder ^{14}N - Atome 9 in der Schicht 3b des Neutronenkonverters 3 können nicht nur die von den Metallatomen 7 stammenden Neutronen erfasst werden, was die Empfindlichkeit des Dosimeters 1 gegenüber den Ausführungsbeispielen gemäß den Figuren 1 und 3 erhöht, sondern vorwiegend auf das Dosimeter 1 auftreffende Neutronen, deren Energiespektrum sehr
10 niederenergetisch ist, so dass diese unmittelbar mit den Atomen 9 eine (n, α)-Reaktion und/oder (n,p)-Reaktion eingehen können.

Das in Figur 3 dargestellte Dosimeter 1 ist also bezüglich der zu detektierenden Neutronenstrahlung empfindlicher als die in den Figuren 1 und 2 dargestellten Dosimeter. Es ist außerdem in der Lage,
15 auch Neutronenstrahlung mit einer niedrigeren unter 30 MeV liegenden Energie und die rückgestreuten Neutronen zu erfassen.

Somit ist das zu messende Energiespektrum des Dosimeters dieser Ausführungsform größer als das der in Figur 1 und 2 gezeigten Dosimeter.

20 Bei dem in Figur 3 dargestellten Ausführungsbeispiel kann die obere Schicht 3a des Neutronenkonverters 3 für sich gesehen mehrere Schichten aufweisen, wie dies anhand des Ausführungsbeispiels in Figur 2 erläutert wurde.

Figur 4 zeigt ein abgewandeltes Ausführungsbeispiel eines Dosimeters 1 im Querschnitt, das grundsätzlich den gleichen Aufbau aufweist wie das in Figur 3 erläuterte. Gleiche Teile sind mit gleichen
25

WO 2005/001512

PCT/EP2004/005845

16

Bezugsziffern versehen, so dass auf die Beschreibung der vorangegangenen Figuren verwiesen wird. Der Neutronenkonverter 3 weist hier allerdings drei Schichten 3a, 3b und 3c auf, wobei die oberste Schicht 3a den einfallenden Neutronen zugewandt ist und die
5 Schicht 3b auf dem Detektionselement 5 aufliegt. Die Schicht 3c liegt zwischen den Schichten 3a und 3b.

Das in Figur 4 dargestellte Ausführungsbeispiel des Dosimeters zeichnet sich also dadurch aus, dass zwischen den Schichten 3a und 3b des Neutronenkonverters 3 eine Schicht 3c vorgesehen ist,
10 die wasserstoffhaltiges Polymer umfasst, beispielsweise Polyethylen (PE) oder Polymethylmethacrylat (PMMA).

Der Neutronenkonverter 3 liegt auf einem Detektionselement 5 auf, wie dies oben im Einzelnen erläutert wurde.

In der Schicht, die wasserstoffhaltige Polymere umfasst, können
15 Neutronen im Energiebereich zwischen einigen 100 KeV und einigen 10 MeV nachgewiesen werden. Hierbei findet elastische Streuung der hochenergetischen Neutronen mit den Protonen des wasserstoffhaltigen Polymers statt. Die Protonen werden dann im Detektionselement 5 nachgewiesen.

20 In der Schicht 3c können auch Neutronen die von oben oder von der Seite in diese Schicht eintreten, mittels elastischer Streuung registriert und erfasst werden.

Wie bei den anhand der vorangegangenen Figuren erläuterten Dosimetern kann die Schicht 3a des in Figur 4 dargestellten Dosimeters
25 1, aber auch die Schicht 3b aus mehreren Schichten bestehen, wie dies anhand des in Figur 2 dargestellten Dosimeters erläutert wurde.

WO 2005/001512

PCT/EP2004/005845

17

Figur 5 zeigt ein abgewandeltes Ausführungsbeispiel eines Dosimeters 1 im Querschnitt, dessen Grundaufbau im Wesentlichen dem entspricht, der in Figur 1 dargestellt ist. Gleiche Teile sind mit gleichen Bezugsziffern versehen, so dass insofern auf die vorangegangene Beschreibung verwiesen wird.

Das in Figur 5 dargestellte Ausführungsbeispiel des Dosimeters 1 zeichnet sich dadurch aus, dass der Neutronenkonverter 3 über die Breite des Dosimeters 1 keine konstante Dicke aufweist. Beispielfhaft ist hier vorgesehen, dass in einem mittleren Bereich die Dicke des Neutronenkonverters 3 größer ist als in den sich daran anschließenden seitlichen Bereichen.

Die Ausgestaltung des dickeren Bereichs ist frei wählbar und an unterschiedliche Detektionsfälle anpassbar. Beispielsweise kann der dickere Bereich im Wesentlichen rechteckförmig ausgebildet sein und sich über die Tiefe des Dosimeters 1 erstrecken. Denkbar ist es aber auch auf der Oberseite des Neutronenkonverters 3 einen viereckigen oder runden Vorsprung vorzusehen, so dass hier ein Bereich größerer Dicke gegeben ist.

Der hier dargestellte Aufbau des Dosimeters 1 bewirkt eine größere Sensibilität des Dosimeters gegenüber einer senkrecht auftreffenden Neutronenstrahlung. Dies deshalb, weil im dickeren Bereich die Anzahl der Metallatome erhöht wird, die von dem Neutronenstrahl getroffen werden können. Damit ergibt sich hier im Bereich größerer Dicke für die Neutronen ein verlängerter Weg innerhalb des Neutronenkonverters 3 und damit eine erhöhte Wahrscheinlichkeit, Metallatome 7 zu treffen.

WO 2005/001512

PCT/EP2004/005845

18

Durchlaufen Neutronenstrahlen den dünneren Bereich des Neutronenkonverters 3 unter einem Winkel, erhöht sich der Weg innerhalb des Konverters gegenüber einer senkrecht eintretenden Strahlung. Damit erhöht sich auch die Wahrscheinlichkeit, dass der Neutronenstrahl auf Metallatome trifft.

Dieser Aufbau ermöglicht es, ein Dosimeter 1 zu realisieren, der die Winkelabhängigkeit bei der Detektion von Neutronenstrahlen reduziert.

Figur 6 zeigt ein Dosimeter 1 in Draufsicht, also eine Draufsicht auf den Neutronenkonverter 3.

Grundsätzlich wird davon ausgegangen, dass der Neutronenkonverter 3 über seine gesamte Ausdehnung – in Draufsicht gesehen – einen gleichen Aufbau aufweist. Eine Draufsicht auf die in den Figuren 1 bis 4 dargestellten Dosimeter zeigte damit keine Struktur. Bei dem Dosimeter nach Figur 5 wäre lediglich der Bereich mit der größeren Dicke zu sehen.

Bei dem hier dargestellten Ausführungsbeispiel des Dosimeters 1 ist vorgesehen, dass der Neutronenkonverter 3 verschiedene Felder aufweist. Beispielhaft sind hier drei unterschiedliche Bereiche N1, N2 und N3 des Neutronenkonverters 3 vorgesehen, die im Wesentlichen rechteckförmig ausgebildet und in einem Abstand zueinander angeordnet sind. Denkbar ist es natürlich auch, die Kontur der Bereiche N1 bis N3 anders auszubilden, beispielsweise kreisförmig, ellipsoid oder dergleichen. Auch ist es möglich, die Bereiche unmittelbar aneinander angrenzen zu lassen und/oder eine andere Anzahl von Bereichen zu wählen.

WO 2005/001512

PCT/EP2004/005845

19

Die Bereiche N1, N2 und N3 unterscheiden sich durch einen unterschiedlichen Aufbau. Dabei kann vorgesehen werden, dass die Bereiche mit Metallatomen unterschiedlicher Kernladungszahl Z versehen sind, verschieden aufgebaute Schichten oder dergleichen aufweisen.

In den verschiedenen Bereichen N1 bis N3 werden, wie oben beschrieben, geladene Teilchen erzeugt, die zu dem unterhalb des Neutronenkonverters 3 liegenden Detektionselement 5 gelangen und dort erfasst werden.

Der unterschiedliche Aufbau der Bereiche N1 bis N3 bedingt, dass die erzeugten geladenen Teilchen unterschiedliche Eigenschaften bezüglich der Energie- und Winkelverteilung aufweisen und damit ein unterschiedliches Detektionsverhalten im Detektionselement 5 bezüglich der drei Bereiche N1 bis N3.

Aus den unterschiedlichen Detektionsergebnissen im Detektionselement 5 kann somit das Energiespektrum und die Winkelverteilung der auf das Dosimeter 1 auftreffenden Neutronenstrahlung bestimmt werden. Dabei können die Eigenschaften der verschiedenen Felder N1 bis N3 variiert und auf Neutronenstrahlungen mit unterschiedlichen Energiespektren abgestimmt werden.

Grundsätzlich wird davon ausgegangen, dass das Detektionselement 5 bei allen anhand der Figuren 1 bis 6 beschriebenen Dosimetern gleich aufgebaut ist. Es lassen sich im Wesentlichen zwei Grundtypen unterscheiden, nämlich aktive Detektionselemente und passive.

WO 2005/001512

20

PCT/EP2004/005845

Ein besonders einfacher Aufbau des Dosimeters 1 ergibt sich, wenn als Detektionselement 5 ein Teilchen registrierendes und speicherndes passives Detektionselement, hier beispielsweise ein anorganischer Kristall wie ein Thermolumineszenzkristall und/oder ein organischer Kristall und/oder ein Hochpolymer, wie Polykarbonat, und/oder ein anorganisches Glas gewählt wird.

In passiven Detektionselementen verursachen die geladenen Teilchen durch die Deponierung von Energie Strahlenschäden, die je nach dem zur Realisierung des Detektionselements verwendeten Material unterschiedlicher Natur sind und auch auf unterschiedliche Weise sichtbar gemacht werden können. Zur Auswertung des Detektionselements 5 wird dieses in der Regel aus dem Dosimeter 1 aufgebaut.

Die geladenen Teilchen verursachen beispielsweise in anorganischen Kristallen wie Thermolumineszenzkristallen, beispielsweise LiF-Mg, Ti oder CaF_2 -Mn, $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ -Mn, Mg_2SiO_4 -Tb CaSO_4 -Dy, BeO-Ma, Al_2O_3 durch die von den geladenen Teilchen deponierte Energie im Festkörperrgitter freigesetzte Elektronen oder Löcher von bestimmten Störstellen eingefangen werden und Haftstellen erzeugen. Diese werden unter Energieabgabe durch gezieltes Aufheizen des Detektionselements 5 in Form von Wärme und Licht wieder frei. Das Licht kann in einem Photodetektor gemessen werden. Die Intensität des Lichts wird als Funktion der Temperatur in einem Spektrum der so genannten Glow-Kurve sichtbar. Die Fläche unter der Kurve ist ein Maß, für die Anzahl der erzeugten Haftstellen und damit für die Anzahl der vom Detektionselement 5 registrierten geladenen Teilchen. Die Anzahl der geladenen Teilchen ist abhängig von der An-

WO 2005/001512

21

PCT/EP2004/005845

zahl der auf das Dosimeter 1 auftreffenden hochenergetischen Neutronen.

Da verschiedene geladene Teilchen unterschiedliche Ionisierungsdichten haben und damit Energiebeträge unterschiedlicher Größe an das Detektionselement 5 abgeben, ist zur Anregung der dabei erzeugten Haftstellen auch eine unterschiedliche Temperatur erforderlich. Das bedeutet, dass in der Glow-Kurve bei unterschiedlichen Temperaturwerten Intensitätsmaxima zu sehen sind, die den unterschiedlichen Strahlungsarten zuzuordnen sind. Man kann also mittels Zuordnung der Intensitätsmaxima eine Aussage über das Teilchenspektrum und damit über die Art der geladenen Teilchen treffen.

Thermolumineszenzdetektoren können sehr erfolgreich auch in Bereichen eingesetzt werden, in denen nicht nur eine Neutronenstrahlung gegeben ist sondern auch eine Photonenstrahlung.

Das Detektionselement 5 kann auch ein organisches Hochpolymer wie Polycarbonat enthalten, vorzugsweise Allyldiglykol-karbonat (CR-39) oder Makrofol. Bei so ausgebildeten Detektionselementen 5 wird die die von den geladenen Teilchen in das Detektionselement 5 eingetragene Energie in latenten Kernspuren gespeichert. Diese können mittels eines chemischen oder elektrochemischen Ätzverfahrens in so genannten Ätzgruben sichtbar gemacht und optisch ausgewertet werden. Die Dichte der innerhalb des Detektionselements 5 gegebenen Kernspuren ist proportional zu der Intensität der registrierten geladenen Teilchen, damit auch der Intensität der eingestrahlten Neutronen.

Es ist auch möglich, das Detektionselement 5 mit Hilfe von anorganischem Glas zu realisieren, in dem ebenfalls Kernspuren durch auf-

WO 2005/001512

PCT/EP2004/005845

22

treffende geladene Teilchen entstehen. Das Glas wird ebenfalls mittels des im Zusammenhang mit Detektionselementen 5 aus Polycarbonat beschriebenen Verfahrens ausgewertet.

Die mit passiven Detektionseinheiten ausgebildeten Detektionselemente 5 werden in der Praxis für einen bestimmten, festgelegten Zeitraum der Strahlung ausgesetzt und dann ausgewechselt und ausgewertet.

Detektionselemente 5 mit passiven Elementen können Felder aufweisen, die unterschiedlich aufgebaut sind. Es kann sich also ein Aufbau ergeben, wie er anhand von Figur 6 bezüglich des Neutronenkonverters 3 erläutert wurde. Mit Detektionselementen 5, die derartige Felder aufweisen, ist es möglich, Energie und Art der auf das Dosimeter 1 auftreffenden Strahlung zu analysieren. Auf diese Weise ist es möglich, mit einem so ausgestalteten Dosimeter 1 nicht nur Neutronenstrahlungen sondern auch gemischte Strahlenfelder zu detektieren, die außer den Neutronen beispielsweise Photonen, unter anderem Gammastrahlung, aufweisen.

Dosimeter 1 der hier angesprochenen Art können auch mit Detektionselementen 5 ausgestattet werden, die mindestens ein aktives Element aufweisen. Diese zeichnen sich dadurch aus, dass die auftreffende Strahlendosis zu jedem Zeitpunkt abrufbar ist. Damit kann die aktuelle Neutronendosis zu jedem Zeitpunkt angezeigt werden.

Bei der Realisierung von aktiven Elementen werden in diesem Zusammenhang bevorzugt MOS-Durchbruchdetektoren verwendet, deren Wirkprinzip auf der Registrierung elektrischer Durchbrüche durch eine SiO₂-Schicht eines MOS-Kondensators beruht. Diese Durchbrüche werden beim Durchgang eines geladenen Teilchens

WO 2005/001512

23

PCT/EP2004/005845

durch die SiO₂-Schicht bei einem anliegenden elektrischen Feld verursacht.

Die Zählrate eines derartigen MOS-Durchbruchdetektors ist bei einer bestimmten Betriebsspannung der Flussdichte, also der Teilchen
5 bezüglich einer bestimmten Fläche, proportional.

Auch bei einem Detektionselement 5 mit einem aktiven Element können unterschiedlich ausgestaltete Felder vorgesehen werden, um gewünschte Strahlenfelder zu analysieren.

Figur 7 zeigt ein Dosimeter 1, das eine Anzahl von Dosimete-
10 menten 1a bis 1h aufweist. Die einzelnen Dosimetelemente sind hier beispielsweise auf einer Kreislinie angeordnet und sind so ausgebildet, wie dies anhand der vorangegangenen Figuren erläutert wurde. Gegebenenfalls können auch Dosimetelemente unterschiedlichen Aufbaus miteinander zu einem Dosimeter kombiniert
15 werden.

Wesentlich ist, dass die Dosimetelemente symmetrisch zueinander angeordnet sind. Vorzugsweise werden sie nicht nur in einer Ebene, wie in Figur 7 dargestellt, angeordnet, sondern auf einem symmetrischen Raumkörper, vorzugsweise auf einer Kugel, um eine Ortsdo-
20 sismessung sowie Richtungsverteilungsmessung durchführen zu können, indem die einzelnen Dosimetelemente aufeinander normiert werden und so unterschiedlich detektierte Dosiswerte an unterschiedlichen Orten der Kugel gemessen werden.

Die Normierung erfolgt dadurch, dass die Messwerte eines Dosimeter-
25 metelements als Normierungs- oder Bezugsgröße angenommen werden. Die Messwerte der anderen Dosimetelemente werden

WO 2005/001512

24

PCT/EP2004/005845

durch diese Normierungsgröße dividiert. Damit ergibt sich für jedes Dosimeteerelement ein normierter Messwert. Die normierten Messwerte erleichtern den Vergleich der registrierten Dosis an verschiedenen Orten der Kugel.

- 5 Möglich ist es im Übrigen auch, mehrere Dosimeteerelemente 1a bis 1h eines Dosimeters 1 auf einem Phantom, nämlich auf einem dem menschlichen Körper nachgebildeten Modell anzuordnen, um eine Richtungsmessung vorzunehmen.

- 10 Dosimeter der hier angesprochenen Art sind, wenn sie als Personendosimeter eingesetzt werden, in einem Gehäuse untergebracht. Ein solches Gehäuse weist typischerweise eine flächige Vorderwand sowie eine flächige Rückwand gleicher Größe auf. Vorder- und Rückwände werden durch Seitenwände voneinander in einem Abstand gehalten, der die Dicke des Gehäuses ausmacht. Typische
15 Maße für ein Gehäuse sind 30 mm x 60 mm für Vorderwand und Rückwand. Die Dicke beträgt 3 bis 15 mm. Das Gehäuse wird aus Kunststoff hergestellt. Soll das Personendosimeter in einem Neutronenstrahlungsfeld eingesetzt werden, in dem ein hoher Neutronenfluss beziehungsweise eine hohe Anzahl von thermischen Neutronen
20 zu erwarten ist, dann muss das Gehäuse einem besonderen Aufbau aufweisenden: die Vorder- und die Rückwand sowie die Seitenwände werden aus verschiedenen Materialien hergestellt. Vorzugsweise ist vorgesehen, dass nur die Seitenwände aus Polyethylen bestehen und Bor- (^{10}B) und/oder Kadmium- (Cd) und/oder Stickstoff- (^{14}N)
25 und/oder Lithium-Atome (^6Li) in Form von chemischen Verbindungen wie beispielsweise Borkarbid (B_4C) enthalten. Da die genannten Elemente langsame Neutronen, die durch die Seitenwände in das Gehäuseinnere und somit auf das Dosimeter gelangen, abschirmen,

WO 2005/001512

25

PCT/EP2004/005845

weist das Personendosimeter in einem so aufgebauten Gehäuse eine verminderte Ansprechfunktion für langsame Neutronen auf. Die durch die Geometrie der Dosimetelemente gegebene überhöhte Registrierung der langsamen Neutronen bei einem Einbau des Dosimeters in ein bekanntes Gehäuse mit Vorderwand, Rückwand und Seitenwänden aus gleichem Material, wird durch die Verwendung des oben beschriebenen Gehäuses für das erfindungsgemäße Dosimeter somit kompensiert. Ferner wird die Richtungsabhängigkeit im Vergleich zu einem Personendosimeter, welches ein bekanntes Gehäuse aus gleichem Material für Vorderwand, Rückwand und Seitenwände verwendet, modifiziert.

In weiteren Ausführungsbeispielen lassen sich zusätzliche Varianten im Gehäuseaufbau realisieren, in die das Dosimeter nach Anspruch 1 und den folgenden Unteransprüchen eingebaut wird.

Im Übrigen ist es möglich, mindestens zwei Dosimetelemente mit unterschiedlichen Metallatomen in einem Gehäuse vorzusehen, um die Energie- und/oder Winkelverteilung eines Neutronenfeldes zu erfassen.

Dosimeter der hier angesprochenen Art können also universell verwendet werden. Dabei kann die Anzahl der Dosimetelemente auf den jeweiligen Detektionsfall angepasst werden.

WO 2005/001512

26

PCT/EP2004/005845

Ansprüche

1. Dosimeter zur Erfassung von hochenergetischer Neutronenstrahlung mit einem Neutronenkonverter und einem Detektionselement, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Neutronenkonverter (3) Metallatome (7) umfasst, die die Energie der zu erfassenden Neutronen umsetzen in Protonen, Alphateilchen und andere geladene Kerne in einem geeigneten Energiebereich, so dass sie detektierbar sind.
5
2. Dosimeter nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Metallatome (7) des Neutronenkonverters (3) eine Kernladungszahl $Z > 15$, vorzugsweise $Z > 20$ aufweisen.
10
3. Dosimeter nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Neutronenkonverter (3) Titan-, Chrom-, Vanadium-, Eisen-, Kupfer-, Wolfram- und/oder Bleiatome umfasst.
4. Dosimeter nach einem der vorhergehenden Ansprüche 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Metallatome (7) des Neutronenkonverters (3) stabil im Sinne der Radioaktivität sind.
15
5. Dosimeter nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Neutronenkonverter (3) Metallatome (7) unterschiedlicher Kernladungszahl enthält.
6. Dosimeter nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Neutronenkonverter (3) Metallatome (7) von Legierungen umfasst.
20
7. Dosimeter nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Neutronenkonverter (3) mindestens zwei

WO 2005/001512

27

PCT/EP2004/005845

Schichten (3a,3b) mit Metallatomen (7) unterschiedlicher Kernladungszahl umfasst.

8. Dosimeter nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Neutronenkonverter (3) Schichten (3a bis 3e) mit Metallatomen (7) umfasst, wobei im Wesentlichen jeweils pro Schicht nur Metallatome (7a bis 7e) mit einer bestimmten Kernladungszahl vorgesehen sind.

9. Dosimeter nach einem der vorhergehenden Ansprüche **dadurch gekennzeichnet**, dass die Schichten (3a bis 3e) des Neutronenkonverters (3) von der der Neutronenstrahlung zugewandten Seite des Dosimeters (1) aus gesehen Metallatome (7a bis 7e) mit absteigender Kernladungszahl enthalten.

10. Dosimeter nach einem der vorhergehenden Ansprüche **dadurch gekennzeichnet**, dass mindestens eine der Schichten (3a bis 3e) mit Metallatomen (7) als Metallfolie, vorzugsweise als gewalzte Metallfolie, oder als mit Metall bedampfte Polymerfolie ausgebildet ist.

11. Dosimeter nach einem der vorhergehenden Ansprüche **dadurch gekennzeichnet**, dass die Folge der Schichten (3a bis 3e) mit Metallatomen (7a bis 7e) unterschiedlicher Kernladungszahl an das Energiespektrum der Neutronenstrahlung angepasst ist.

12. Dosimeter nach einem der vorhergehenden Ansprüche **dadurch gekennzeichnet**, dass der Neutronenkonverter (3) von der der Neutronenstrahlung zugewandten Seite des Dosimeters (1) aus gesehen vor dem Detektionselement (5) - vorzugsweise in einer dünnen Schicht angeordnete - ^6Li - und/oder ^{10}B -Atome und/oder ^{14}N -Atome (9) aufweist.

WO 2005/001512

28

PCT/EP2004/005845

13. Dosimeter nach einem der vorhergehenden Ansprüche **dadurch gekennzeichnet**, dass mindestens zwei DosimETERelemente mit unterschiedlichen Metallatomen (7) zur Messung der Energie- und/oder Winkelverteilung in einem Gehäuse anordenbar sind.

5 14. Dosimeter nach einem der vorhergehenden Ansprüche **dadurch gekennzeichnet**, dass der Neutronenkonverter (3) zwischen den Metallatomen (7) und den ^6Li - und/oder ^{10}B - und/oder ^{14}N -Atomen (9) ein wasserstoffhaltiges Polymer aufweist.

10 15. Dosimeter nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Neutronenkonverter (3) Schichten umfasst, wobei die der Neutronenstrahlung zugewandte erste Schicht (3a) Metallatome, die zweite Schicht (3c) das wasserstoffhaltige Polymer und die dritte Schicht (3b) ^6Li - und/oder ^{10}B - und/oder ^{14}N -Atome (9) enthält.

15 16. Dosimeter nach einem der vorhergehenden Ansprüche **dadurch gekennzeichnet**, dass der Neutronenkonverter (3) räumlich nebeneinander angeordnete Felder (N1,N2,N3) mit unterschiedlichem Aufbau aufweist.

20 17. Dosimeter nach einem der vorhergehenden Ansprüche **gekennzeichnet durch**, eine Anzahl von DosimETERelementen (1a bis 1h), die auf einer Kugelfläche vorzugsweise symmetrisch anordenbar sind, um eine Ortsdosismessung und eine Richtungsverteilungsmessung vorzunehmen.

25 18. Dosimeter nach einem der vorhergehenden Ansprüche **gekennzeichnet durch**, eine Anzahl von DosimETERelementen, die auf einem

WO 2005/001512

29

PCT/EP2004/005845

Phantom anordenbar sind, um eine Richtungsmessung vorzunehmen.

19. Dosimeter nach einem der vorhergehenden Ansprüche **dadurch gekennzeichnet**, dass das Detektionselement (5) mindestens ein
5 passives Element und/oder mindestens ein aktives Element umfasst.

20. Dosimeter nach einem der vorhergehenden Ansprüche **dadurch gekennzeichnet**, dass das passive Element organisches Hochpoly-
mer, vorzugsweise Polycarbonat oder Cellulosenitrat (vorzugsweise
CR39 oder Makrofol), und/oder ein anorganisches Kristall und/oder
10 Mineral, vorzugsweise ein Thermolumineszenzkristall insbesondere
LiF, und/oder anorganische Gläser und/oder ein organisches Kristall
umfasst.

21. Dosimeter nach einem der vorhergehenden Ansprüche **dadurch gekennzeichnet**, dass das aktive Element einen Halbleiter, vor-
15 zugsweise Silizium, aufweist.

22. Dosimeter nach einem der vorhergehenden Ansprüche **dadurch gekennzeichnet**, dass ein Photonendosimeter vorgesehen ist.

23. Dosimeter nach einem der vorhergehenden Ansprüche **dadurch gekennzeichnet**, dass die Konverterschichten und das Detektionse-
20 lement in einem Gehäuse unterbringbar sind, welches eine Vorder-
und eine Rückwand, sowie Seitenwände aufweist.

24. Dosimeter nach einem der vorhergehenden Ansprüche **dadurch gekennzeichnet**, dass die Seitenwände Bor-, und/oder Kadmium-
und/oder Stickstoff- (^{14}N) und/oder Lithium-Atome (^6Li) enthalten.

25

WO 2005/001512

PCT/EP2004/005845

1 / 4

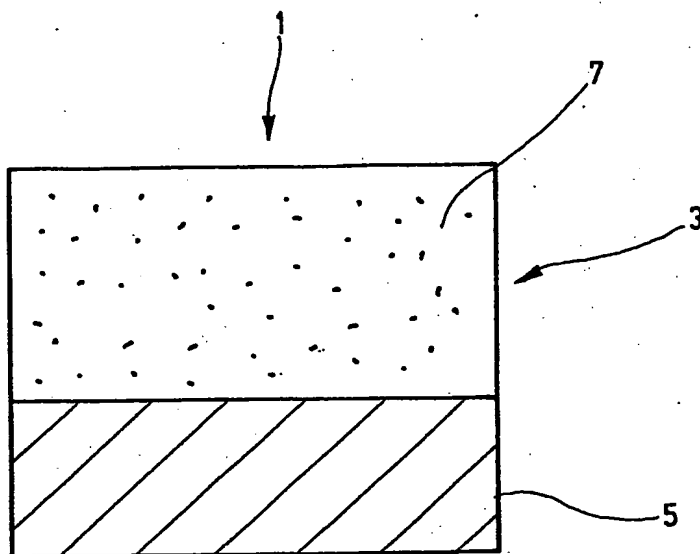


Fig.1

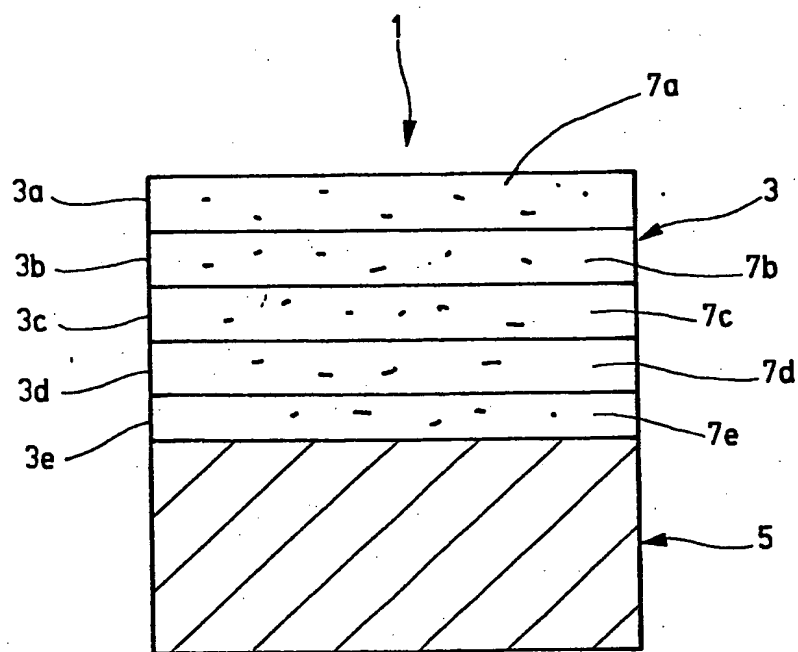


Fig.2

WO 2005/001512

PCT/EP2004/005845

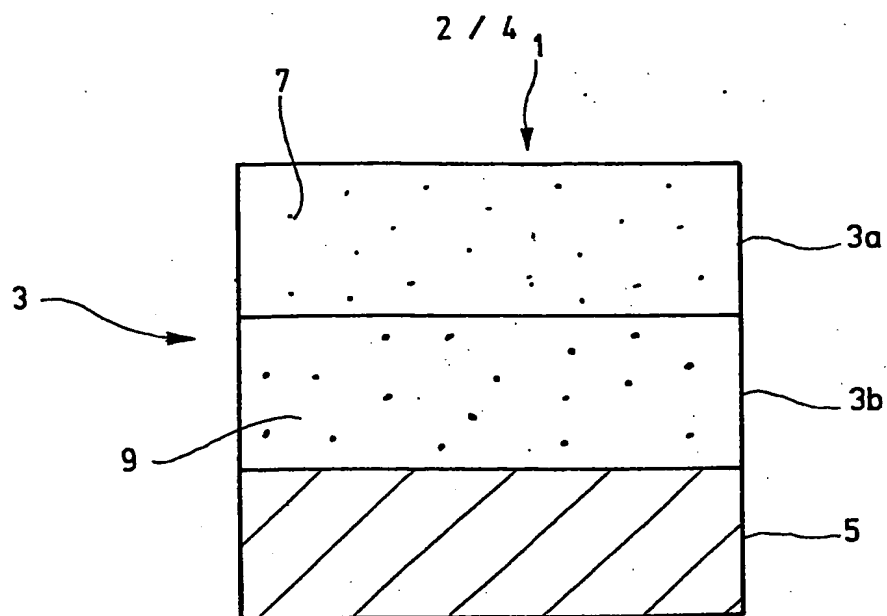


Fig.3

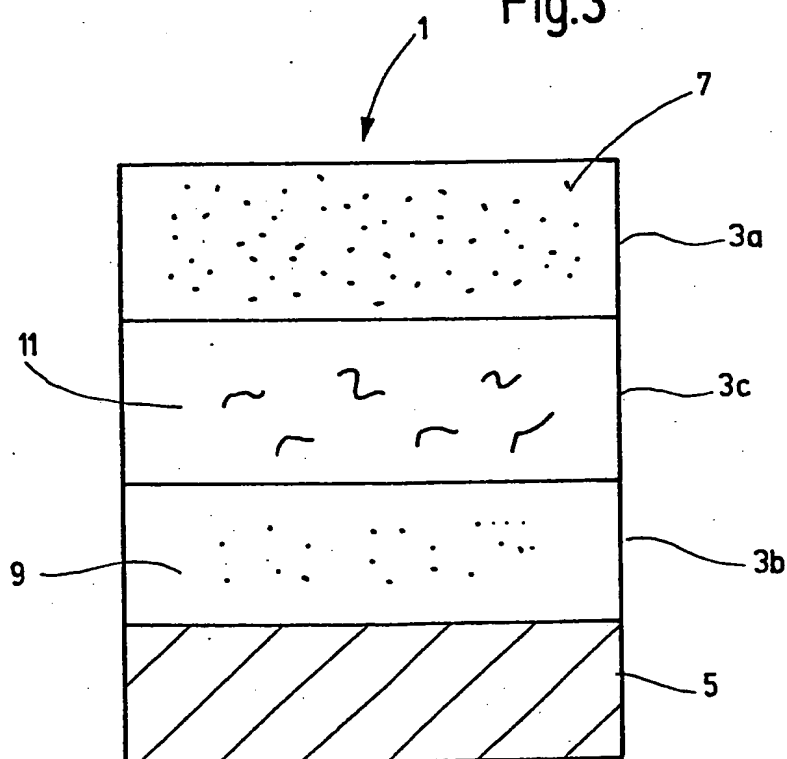


Fig.4

WO 2005/001512

PCT/EP2004/005845

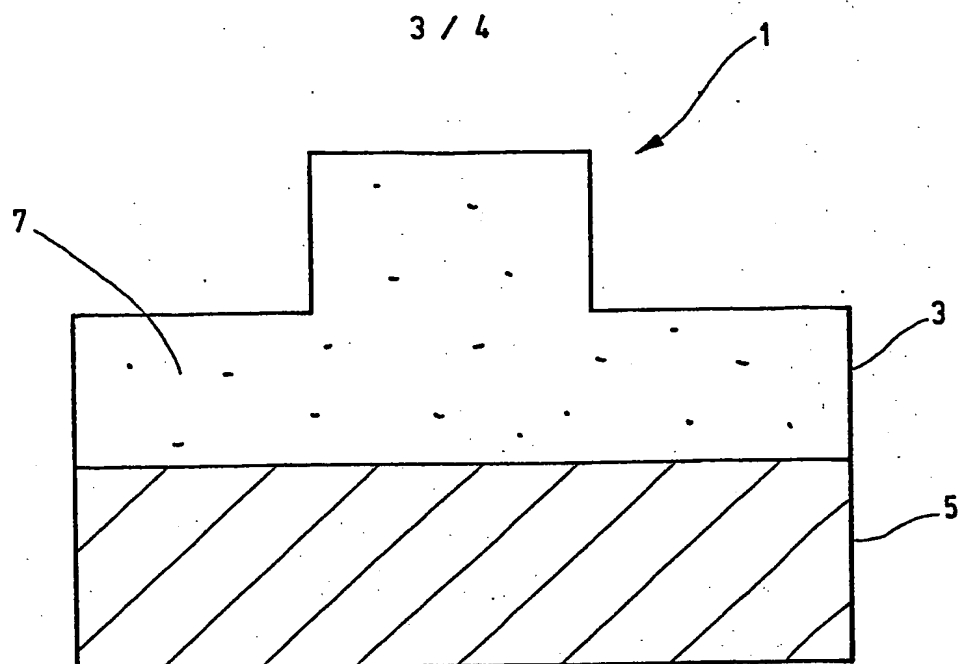


Fig.5

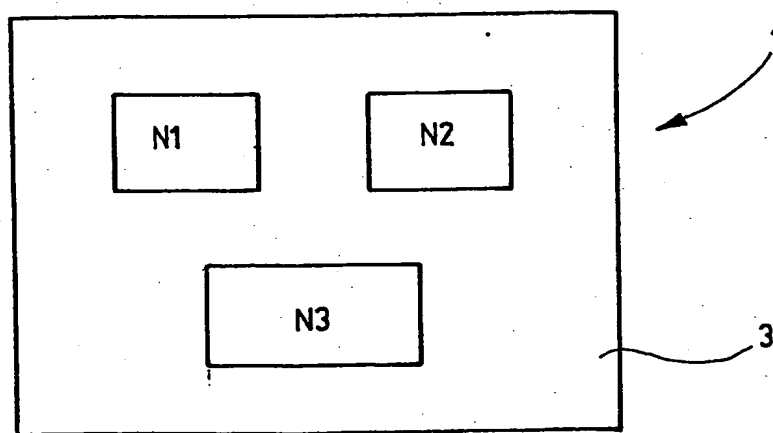


Fig.6

WO 2005/001512

PCT/EP2004/005845

4 / 4

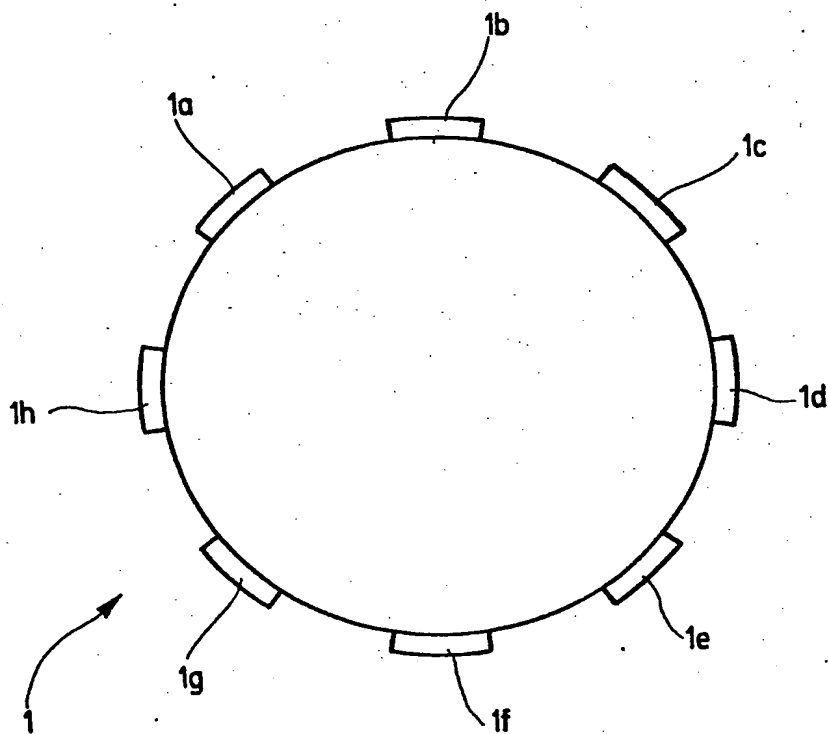


Fig.7